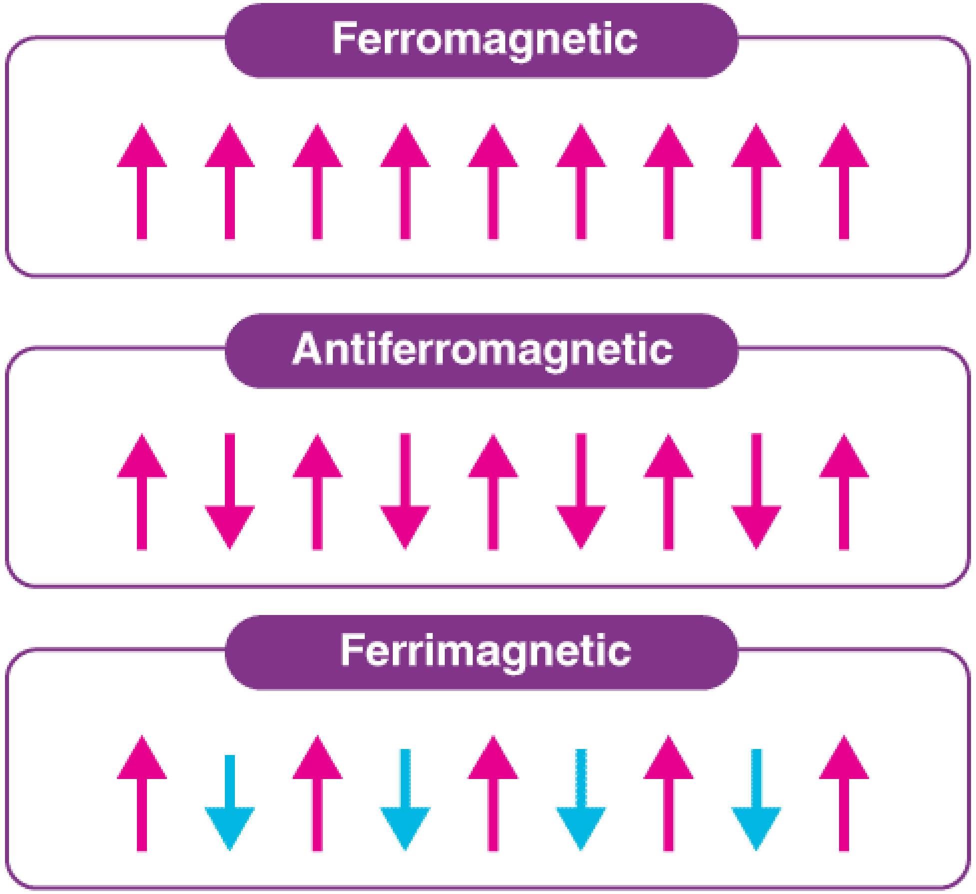
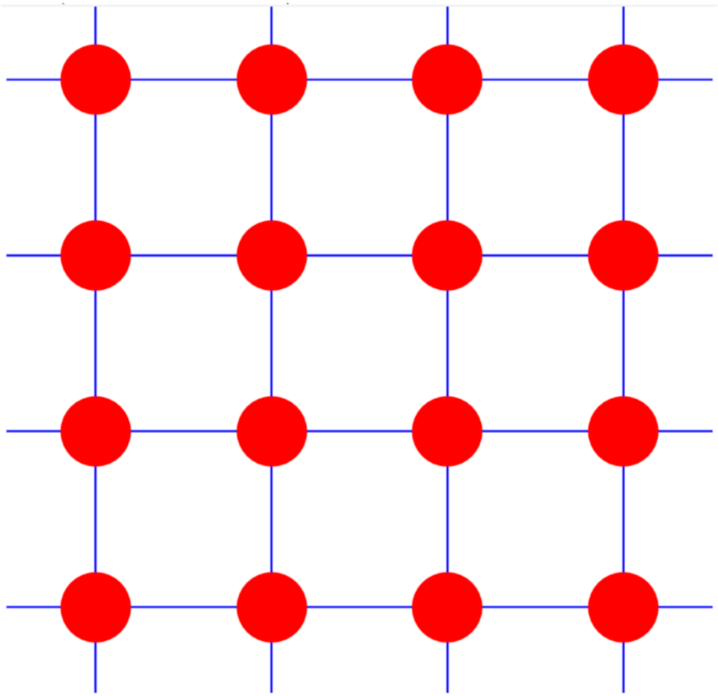
Эффект близости в гетероструктурах сверхпроводник/магнетик

Студент: Корнев А. В.
Руководитель: Бобкова И. В.

Летняя школа по теоретической физике ИТФ им. Ландау РАН
г. Черноголовка – 29 августа 2023

Модель





Гамильтониан теории БКШ. Приближение сильной связи

Гамильтониан:

$$\widehat{H} = -t\sum_{\boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\sigma}\hat{c}^{\dagger}_{\boldsymbol{i}\sigma}\hat{c}_{\boldsymbol{j}\sigma} + \sum_{\boldsymbol{i}}\left(\Delta_{\boldsymbol{i}}\hat{c}^{\dagger}_{\boldsymbol{i},\uparrow}\hat{c}^{\dagger}_{\boldsymbol{i},\downarrow} + h.c.\right) - \mu\sum_{\boldsymbol{i}\sigma}\hat{n}_{\boldsymbol{i}\sigma} + \sum_{\boldsymbol{i}\alpha\beta}\hat{c}^{\dagger}_{\boldsymbol{i}\alpha}(\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma})_{\alpha\beta}\hat{c}_{\boldsymbol{i}\beta} \qquad \hat{n}_{\boldsymbol{i}\sigma} = \hat{c}^{\dagger}_{\boldsymbol{i}\sigma}\hat{c}_{\boldsymbol{i}\sigma}$$

Преобразования Боголюбова:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\end{pmatrix}$$

$$\hat{c}_{\boldsymbol{i}\sigma} = \sum_n u^{\boldsymbol{i}}_{n\sigma}\hat{b}_n + v^{\boldsymbol{i}*}_{n\sigma}\hat{b}^{\dagger}_n$$

Уравнение самосогласования параметра порядка:

$$\Delta_i = \lambda\langle\hat{c}_{\boldsymbol{i}\downarrow}\hat{c}_{\boldsymbol{i}\uparrow}\rangle = \lambda\sum_n\left(u^i_{n,\downarrow}v^{i*}_{n,\uparrow}(1-f_n) + u^i_{n,\uparrow}v^{i*}_{n,\downarrow}f_n\right) \qquad f_n = \left\langle\hat{b}^{\dagger}_n\hat{b}_n\right\rangle = \frac{1}{1+\exp\frac{\varepsilon_n}{T}}$$

Уравнения Боголюбова – де Женна

$$-\mu u^{i}_{n,\sigma} - t\sum u^{j}_{n,\sigma} + \sigma\Delta_i v^{i}_{n,-\sigma} + (\mathbf{m}_i\boldsymbol{\sigma})_{\sigma\alpha} u^{i}_{n,\alpha} = \varepsilon_n u^{i}_{n,\sigma}$$

$$-\mu v^{i}_{n,\sigma} - t\sum v^{j}_{n,\sigma} + \sigma\Delta_i^{*} u^{i}_{n,-\sigma} + (\mathbf{m}_i\boldsymbol{\sigma}^{*})_{\sigma\alpha} v^{i}_{n,\alpha} = -\varepsilon_n v^{i}_{n,\sigma}$$

t – амплитуда «прыжка»

химический потенциал

намагниченность / обменное поле

функции квазичастиц «электрон» / «дырка»

$$\sum_i \left|u^{i}_{n,\sigma}\right|^2 + \left|v^{i}_{n,\sigma}\right|^2 = 1$$

индекс узла

$$\begin{pmatrix} u^{i}_{n,\sigma} \\ v^{i}_{n,\sigma} \end{pmatrix} \quad \varepsilon_n$$

энергия

n — электронное состояние

$\sigma = \pm 1$ (↑/↓) — направление спина

Уравнение самосогласования:

$$\Delta_i = \lambda \sum_n u^{i}_{n,\downarrow} v^{i*}_{n,\uparrow}(1 - f_n) + u^{i}_{n,\uparrow} v^{i*}_{n,\downarrow} f_n\,, \qquad f_n = \frac{1}{1 + \exp\frac{\varepsilon_n}{T}}$$

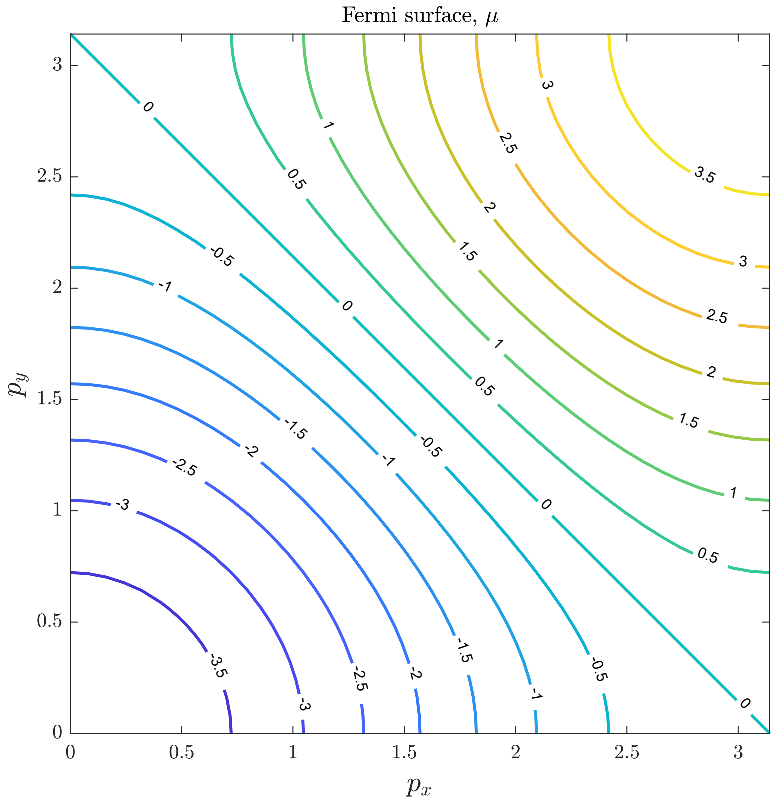
ПП

константа спаривания

Фурье преобразование

$$u^{\boldsymbol{i}}_{n,\sigma} = \frac{1}{(2\pi)^2}\iint_{BZ_1} d^2\mathbf{p}\, u_{n\sigma}(\mathbf{p})\, \mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}_{\boldsymbol{i}})},$$

$$u_{n\sigma}(\mathbf{p}) = \sum_{\boldsymbol{i}} u^{\boldsymbol{i}}_{n,\sigma}\, \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}_{\boldsymbol{i}})}$$



$$\left(-\mu - 2t\left[\cos p_x a + \cos p_y a\right]\right)u_{n\sigma}(\mathbf{p}) + \sigma\Delta_{\boldsymbol{i}} v_{n,-\sigma}(\mathbf{p}) + (\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma})_{\sigma\alpha} u_{n\alpha}(\mathbf{p}) = \varepsilon_n u_{n\sigma}(\mathbf{p})$$

$$\left(-\mu - 2t\left[\cos p_x a + \cos p_y a\right]\right)v_{n\sigma}(\mathbf{p}) + \sigma\Delta^*_{\boldsymbol{i}} u_{n,-\sigma}(\mathbf{p}) + (\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma}^*)_{\sigma\alpha} v_{n\alpha}(\mathbf{p}) = -\varepsilon_n v_{n\sigma}(\mathbf{p})$$

$$\Delta = \frac{1}{(2\pi)^2}\sum_n \iint_{BZ_1} d^2\mathbf{p}\left\{u_{n\downarrow}(\mathbf{p}) v^*_{n,\uparrow}(\mathbf{p})\big(1 - f_n(\mathbf{p})\big) + u_{n,\uparrow}(\mathbf{p}) v^*_{n,\downarrow}(\mathbf{p}) f_n(\mathbf{p})\right\}$$

Фурье преобразование

$$\left(-\mu - 2t\left[\cos p_x a + \cos p_y a\right]\right)u_{n\sigma}(\mathbf{p}) + \sigma\Delta_{\boldsymbol{i}} v_{n,-\sigma}(\mathbf{p}) + (\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma})_{\sigma\alpha} u_{n\alpha}(\mathbf{p}) = \varepsilon_n u_{n\sigma}(\mathbf{p})$$

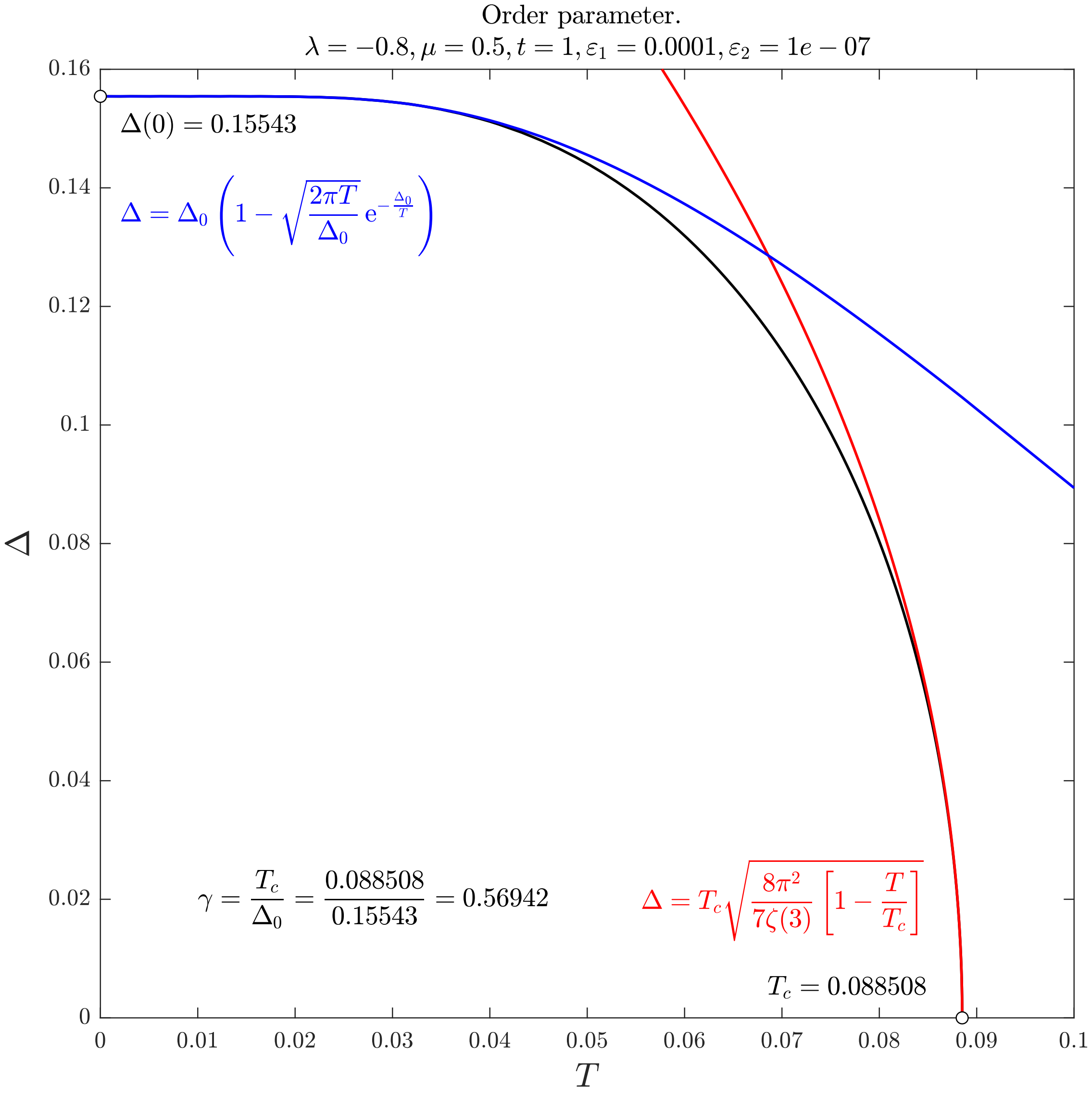
$$\left(-\mu - 2t\left[\cos p_x a + \cos p_y a\right]\right)v_{n\sigma}(\mathbf{p}) + \sigma\Delta_{\boldsymbol{i}}^* u_{n,-\sigma}(\mathbf{p}) + (\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma}^*)_{\sigma\alpha} v_{n\alpha}(\mathbf{p}) = -\varepsilon_n v_{n\sigma}(\mathbf{p})$$

$$\begin{pmatrix} \begin{matrix}-\mu - 2t\left[\cos p_x a + \cos p_y a\right] \\ +(\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma})_{\uparrow\uparrow}\end{matrix} & (\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma})_{\uparrow\downarrow} & 0 & \Delta \\ (\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma})_{\downarrow\uparrow} & \begin{matrix}-\mu - 2t\left[\cos p_x a + \cos p_y a\right] \\ +(\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma})_{\downarrow\downarrow}\end{matrix} & -\Delta & 0 \\ 0 & -\Delta^* & \begin{matrix}\mu + 2t\left[\cos p_x a + \cos p_y a\right] \\ -(\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma}^*)_{\uparrow\uparrow}\end{matrix} & -(\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma}^*)_{\uparrow\downarrow} \\ \Delta^* & 0 & -(\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma}^*)_{\downarrow\uparrow} & \begin{matrix}\mu + 2t\left[\cos p_x a + \cos p_y a\right] \\ -(\mathbf{m}_{\boldsymbol{i}}\boldsymbol{\sigma}^*)_{\downarrow\downarrow}\end{matrix} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{n\uparrow} \\ u_{n\downarrow} \\ v_{n\uparrow} \\ v_{n\downarrow} \end{pmatrix} = \varepsilon_n \begin{pmatrix} u_{n\uparrow} \\ u_{n\downarrow} \\ v_{n\uparrow} \\ v_{n\downarrow} \end{pmatrix}$$

Объёмный сверхпроводник

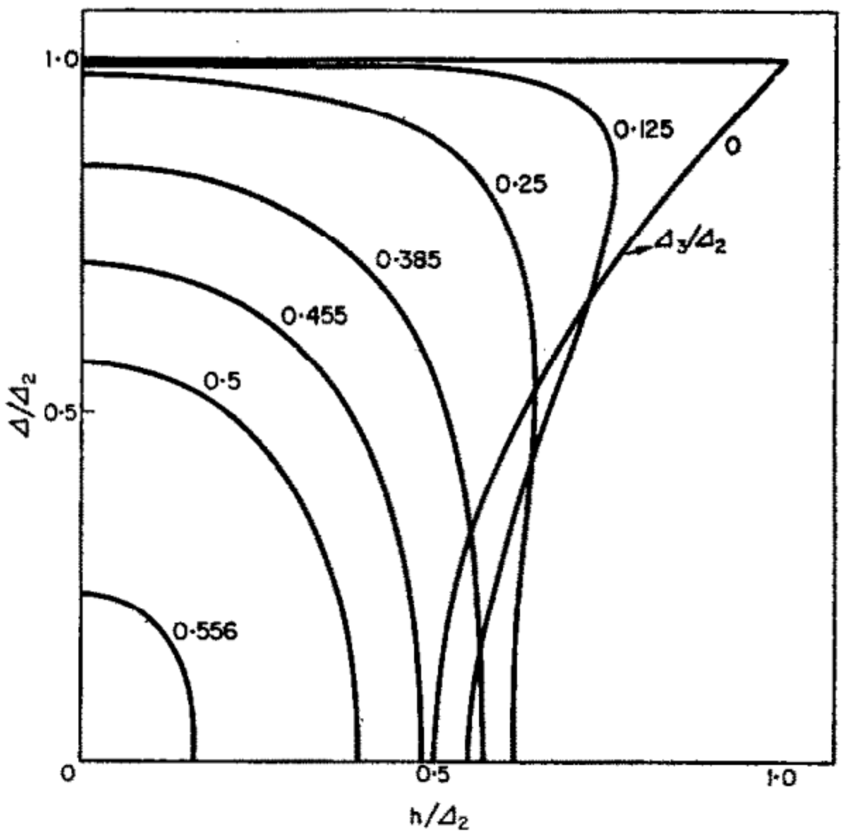
Зависимость параметра порядка от температуры

- Асимптотики:
- $T \ll T_c$
- $T \approx T_c$

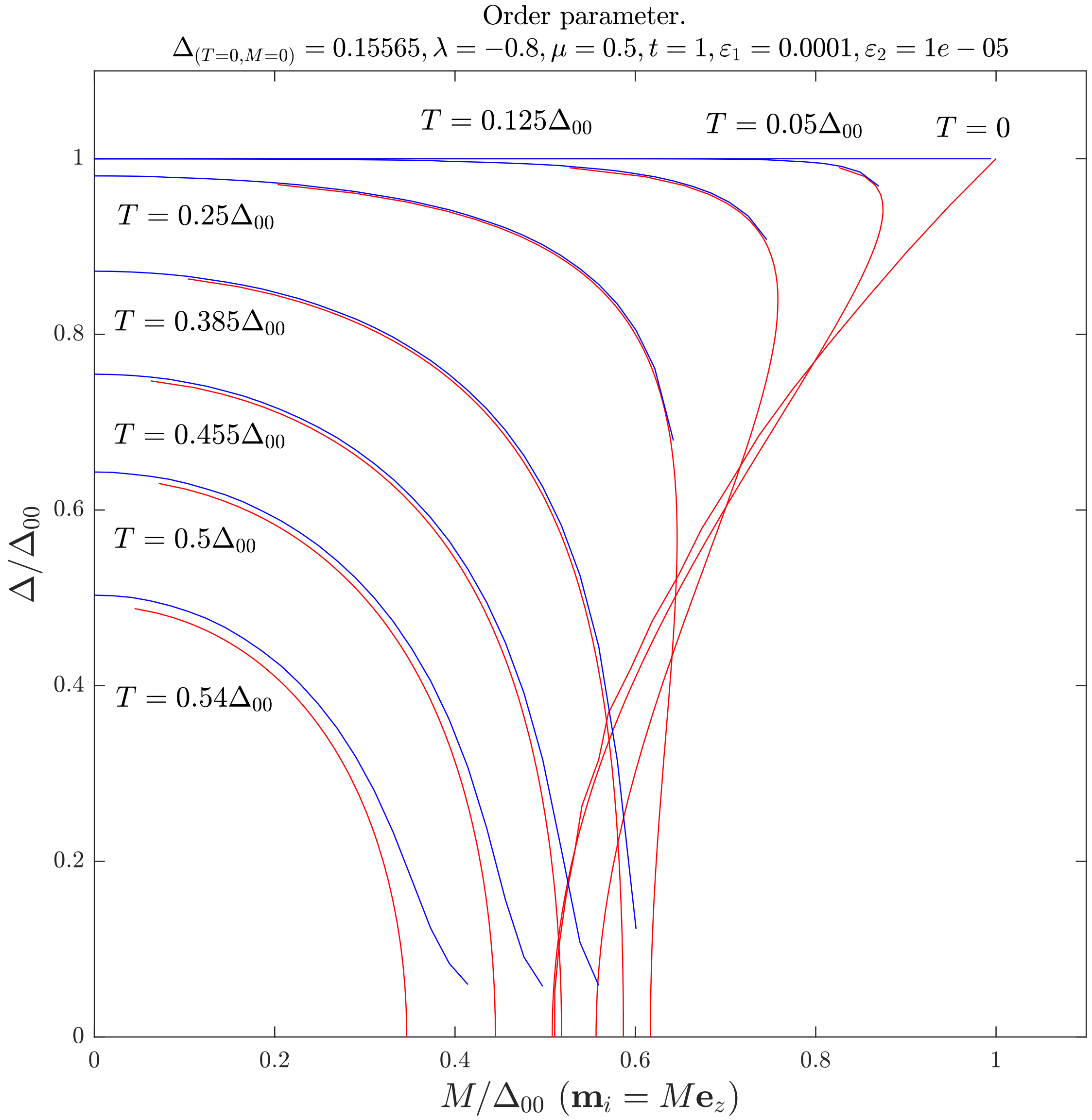


Ферромагнетик

Зависимость параметра порядка от величины обменного поля

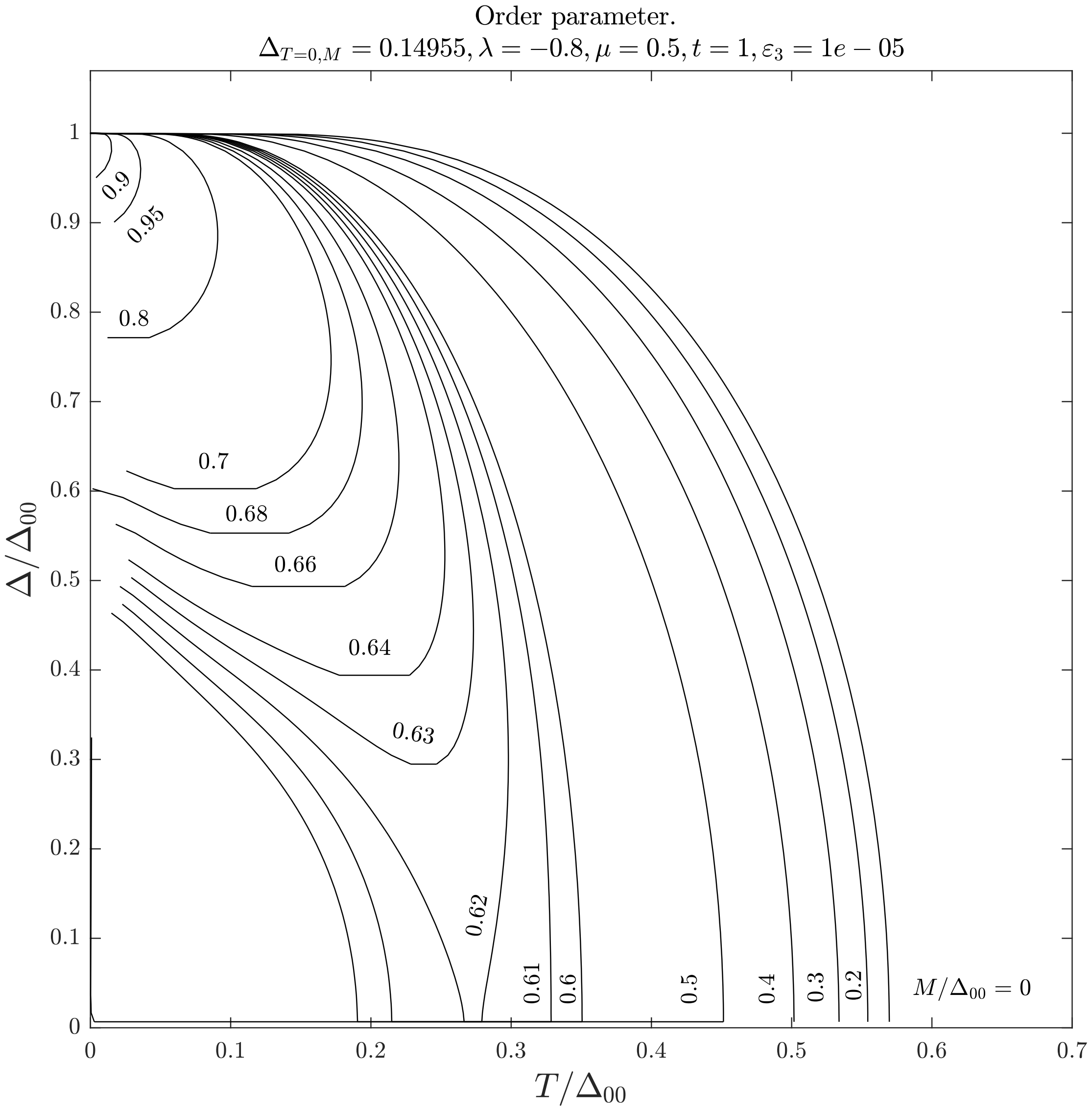


G. Sarma, J. Phys. Chem. Solids **24**, 1029 (1963)



Ферромагнетик

Зависимость параметра порядка от температуры

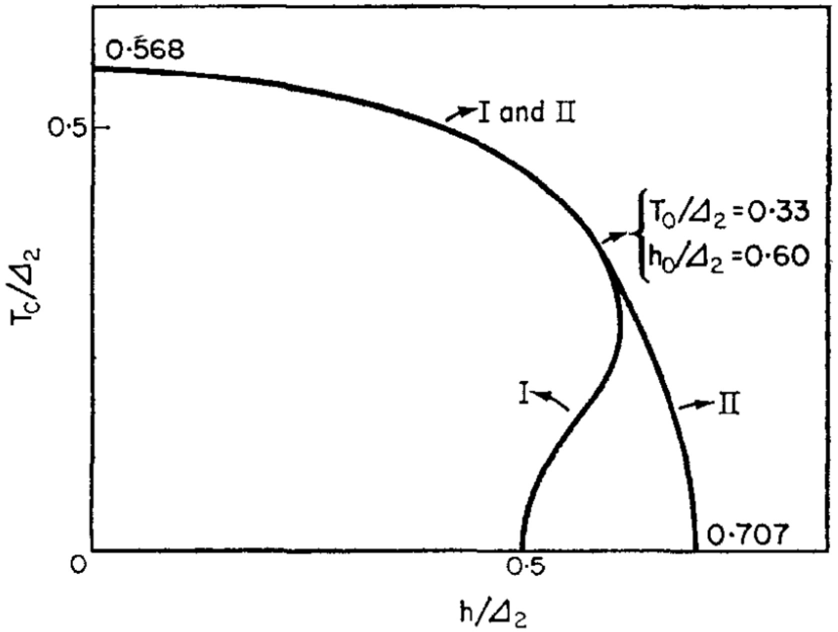


Ферромагнетик

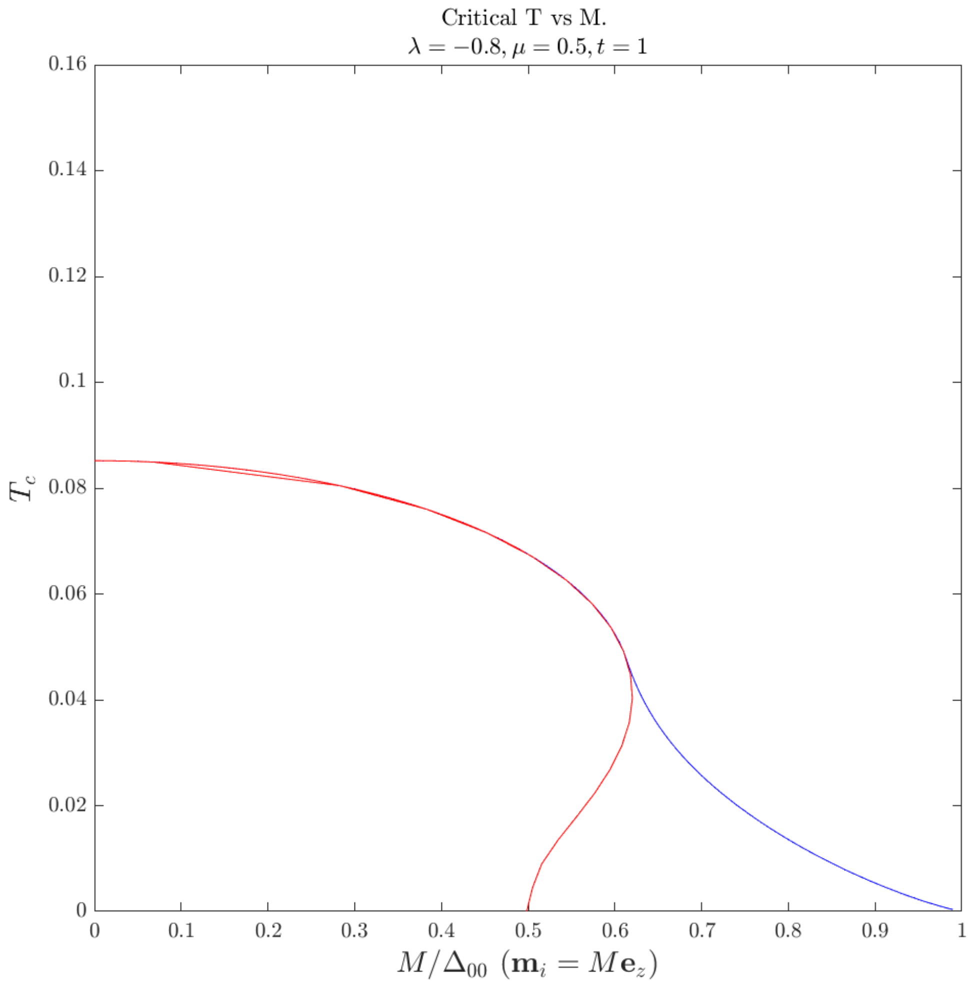
Зависимость параметра порядка от температуры

Ферромагнетик

Зависимость критической температуры от величины обменного поля



G. Sarma, J. Phys. Chem. Solids **24**, 1029 (1963)



Аномальная функция Грина

Аномальная функция Грина в мацубаровском представлении:

$$F_{\boldsymbol{ii},\alpha\beta}(\tau) = -\langle T_\tau \hat{c}_{\boldsymbol{i}\alpha}(\tau)\hat{c}_{\boldsymbol{i}\beta}(0)\rangle$$

Мацубаровский оператор уничтожения:

$$\hat{c}_{\boldsymbol{i}\sigma}(\tau) = \sum_n u_{n\alpha}^{\boldsymbol{i}} \hat{b}_n e^{-\varepsilon_n \tau} + v_{n\alpha}^{\boldsymbol{i}*} \hat{b}_n^\dagger e^{\varepsilon_n \tau}$$

$$F_{\boldsymbol{ii},\alpha\beta}(\tau) = -\sum_n \left\{ u_{n\alpha}^{\boldsymbol{i}} v_{n\beta}^{\boldsymbol{i}*} (1 - f_n)\, e^{-\varepsilon_n \tau} + v_{n\alpha}^{\boldsymbol{i}*} u_{n\beta}^{\boldsymbol{i}} f_n\, e^{\varepsilon_n \tau} \right\}$$

$$F_{\boldsymbol{ii},\alpha\beta}(\omega_m) = \int_0^{1/T} F_{\boldsymbol{ii},\alpha\beta}(\tau)\, e^{\mathrm{i}\omega_m \tau}\, d\tau\,, \qquad \omega_m = \pi T(2m+1)$$

$$F_{\boldsymbol{ii},\alpha\beta}(\omega_m) = \sum_n \left\{ \frac{u_{n\alpha}^{\boldsymbol{i}} v_{n\beta}^{\boldsymbol{i}*}}{\mathrm{i}\omega_m - \varepsilon_n} + \frac{v_{n\alpha}^{\boldsymbol{i}*} u_{n\beta}^{i}}{\mathrm{i}\omega_m + \varepsilon_n} \right\}$$

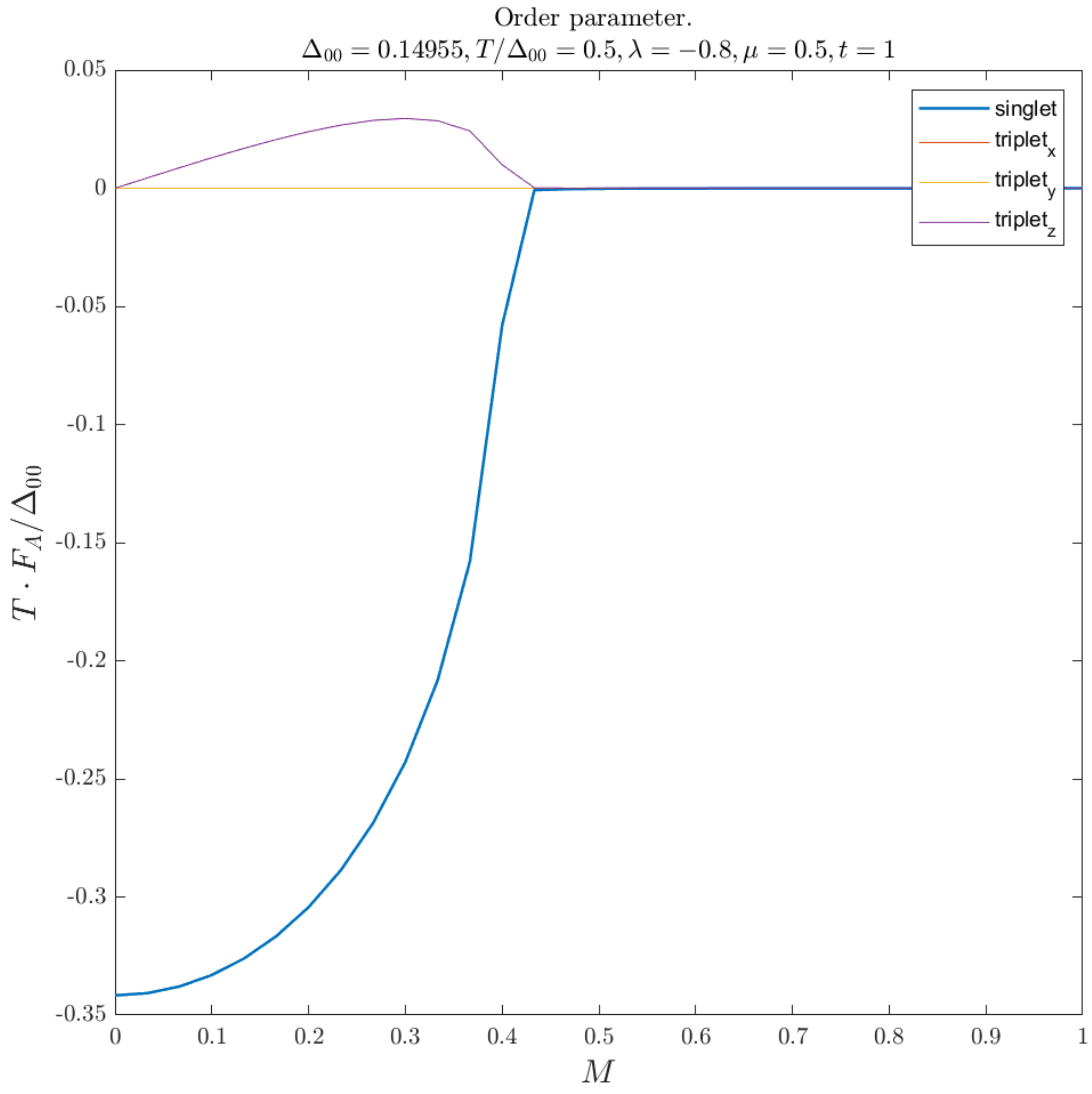
Ферромагнетик

Амплитуды синглетных и триплетных корреляций

$$F_{\boldsymbol{ii},\alpha\beta}(\tau) = -\langle T_\tau \hat{c}_{\boldsymbol{i}\alpha}(\tau)\hat{c}_{\boldsymbol{i}\beta}(0)\rangle$$

$$F_{\boldsymbol{ii},\alpha\beta}(\omega_m) = \sum_n \left\{\frac{u^{\boldsymbol{i}}_{n\alpha} v^{\boldsymbol{i}*}_{n\beta}}{\mathrm{i}\omega_m - \varepsilon_n} + \frac{v^{\boldsymbol{i}*}_{n\alpha} u^{i}_{n\beta}}{\mathrm{i}\omega_m + \varepsilon_n}\right\}$$

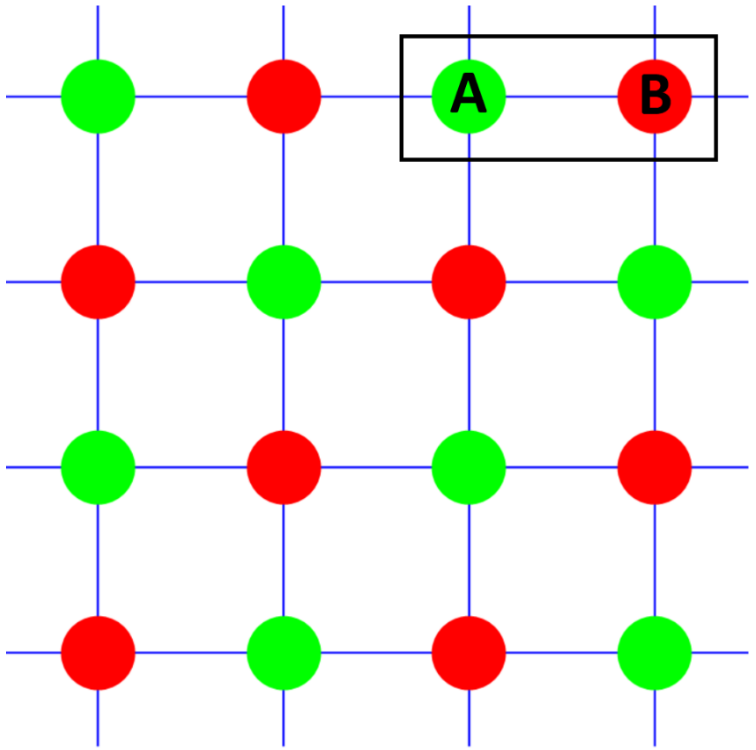
$$F_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} F_{\uparrow\uparrow} & F_{\uparrow\downarrow} \\ F_{\downarrow\uparrow} & F_{\downarrow\downarrow} \end{pmatrix} = (F^s + \mathbf{F}^t \boldsymbol{\sigma}) \cdot \mathrm{i}\sigma_y$$



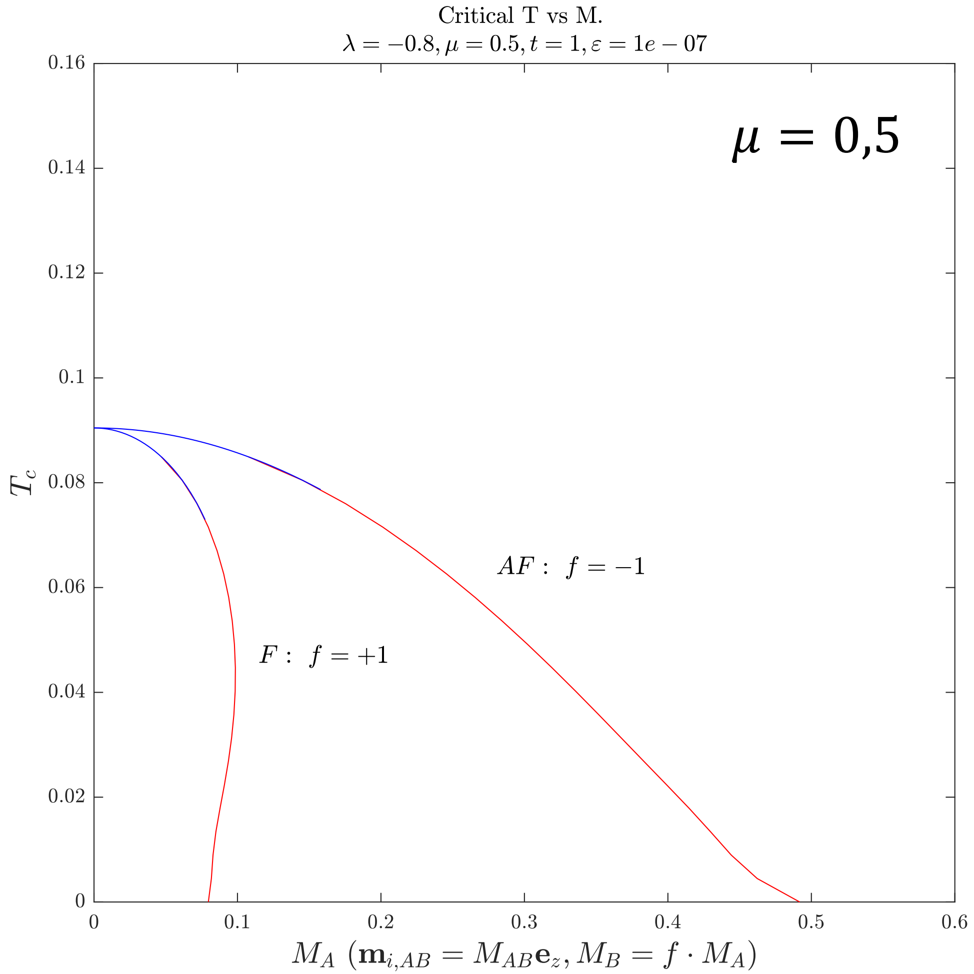
Двухрешеточный формализм

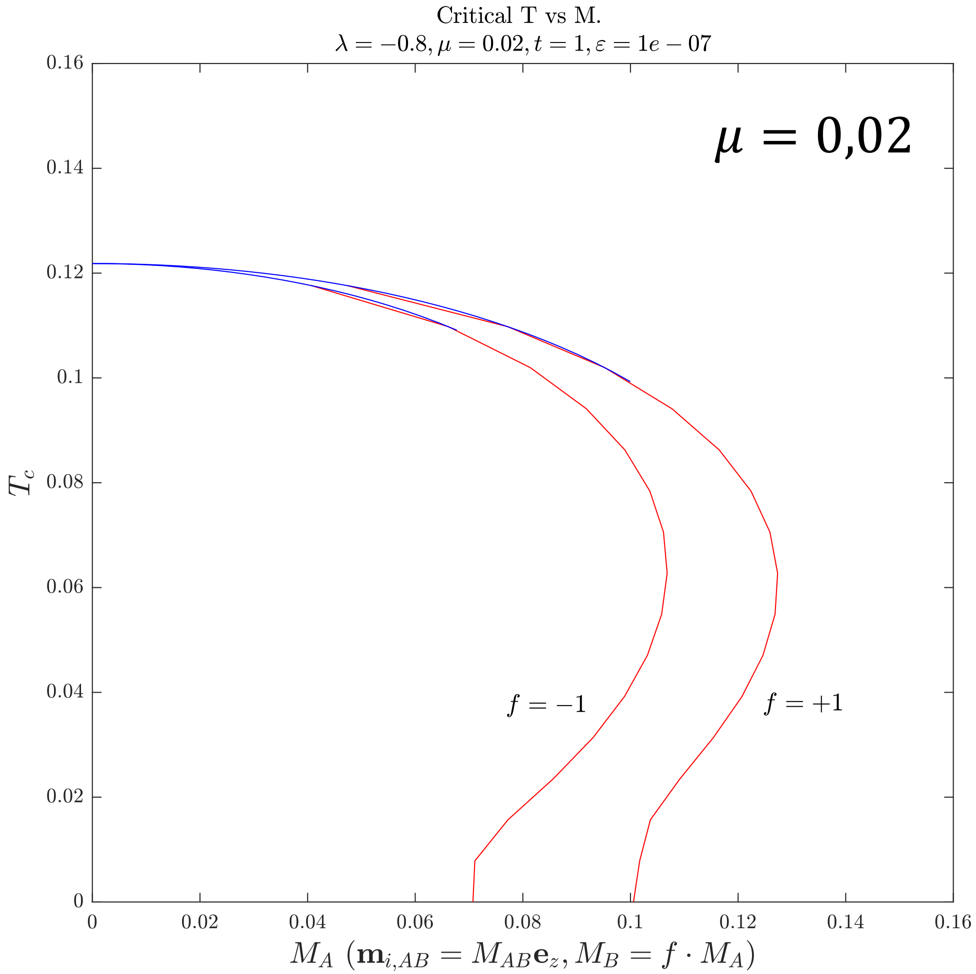
$$u_{n,\sigma}^{A,B}(p_x, p_y), v_{n,\sigma}^{A,B}(p_x, p_y)$$
$$\Delta^A, \Delta^B$$

$$M^B = f \cdot M^A$$

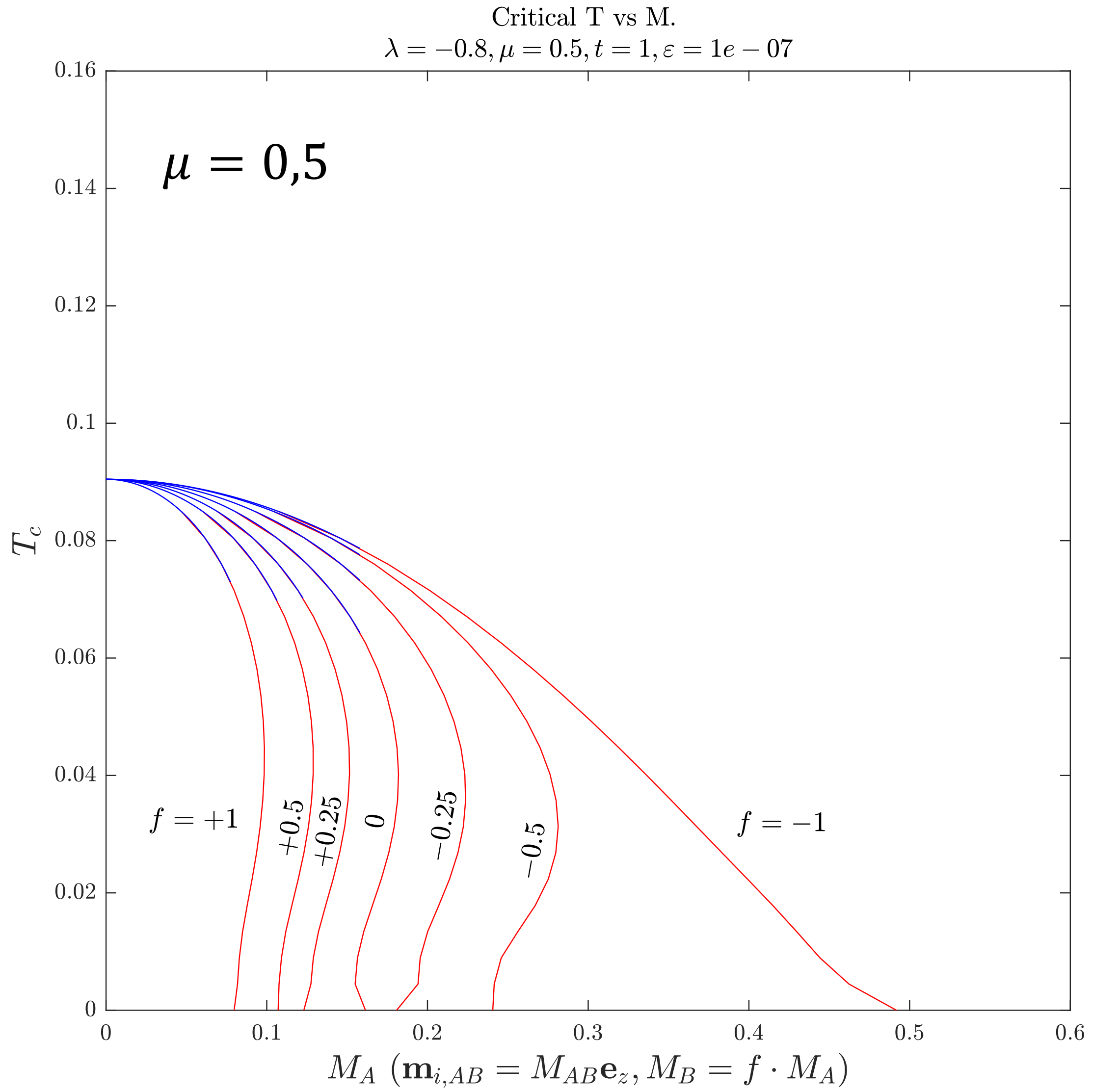


Антиферромагнетик

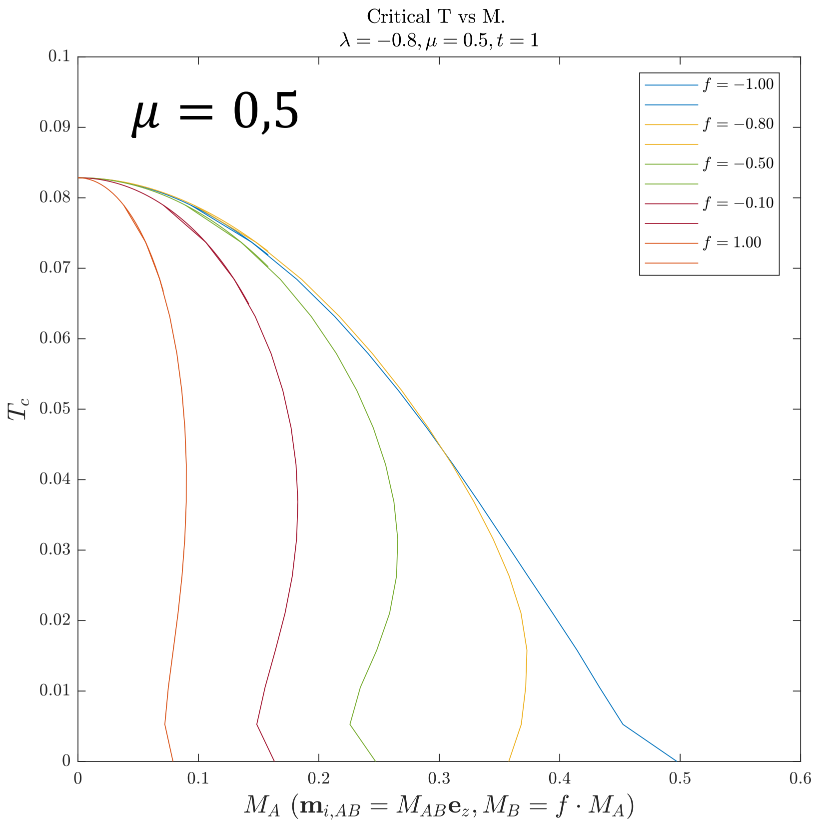


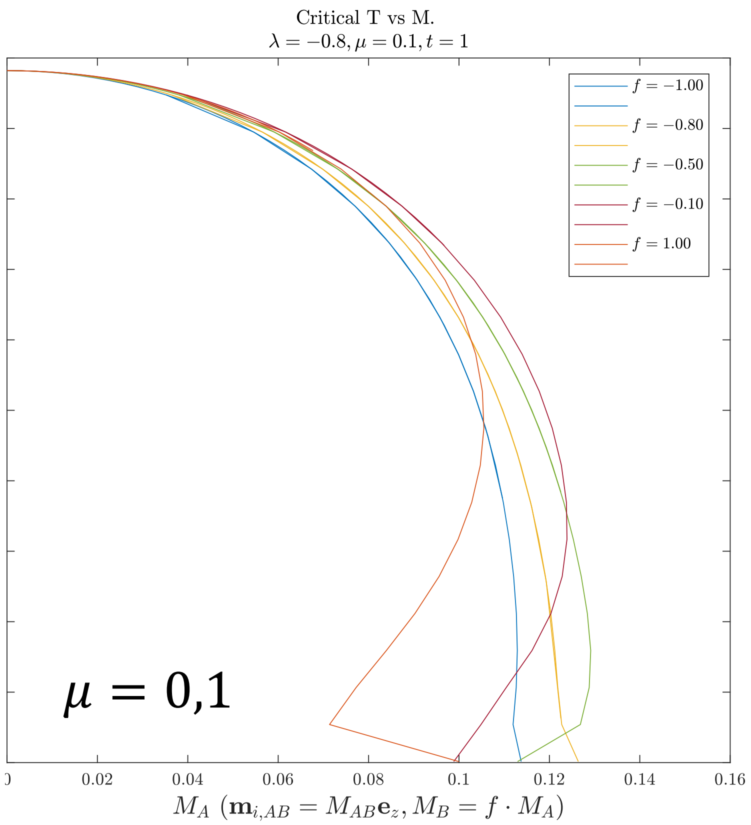


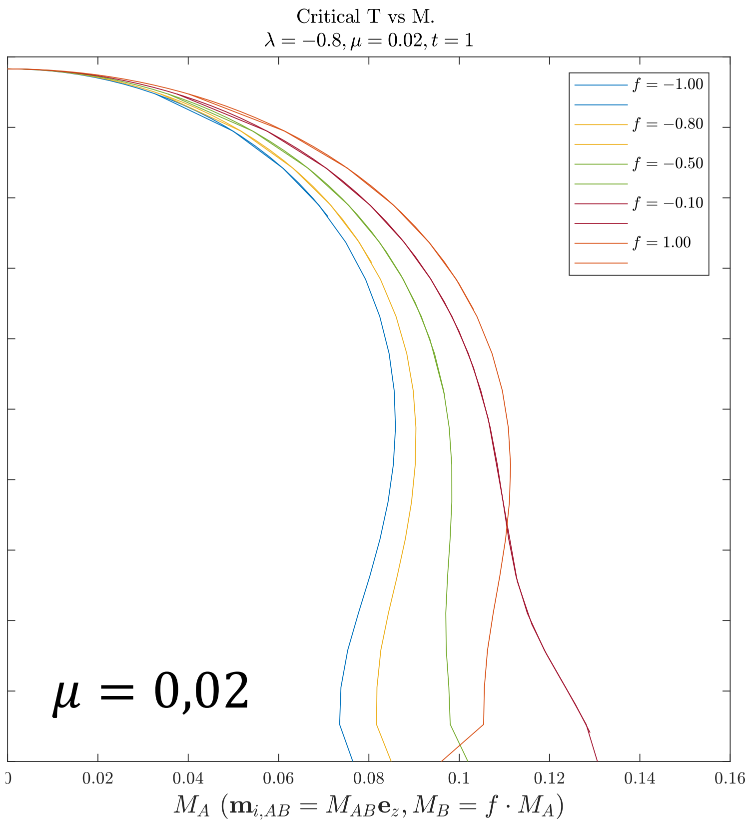
Ферримагнетик



2 режима

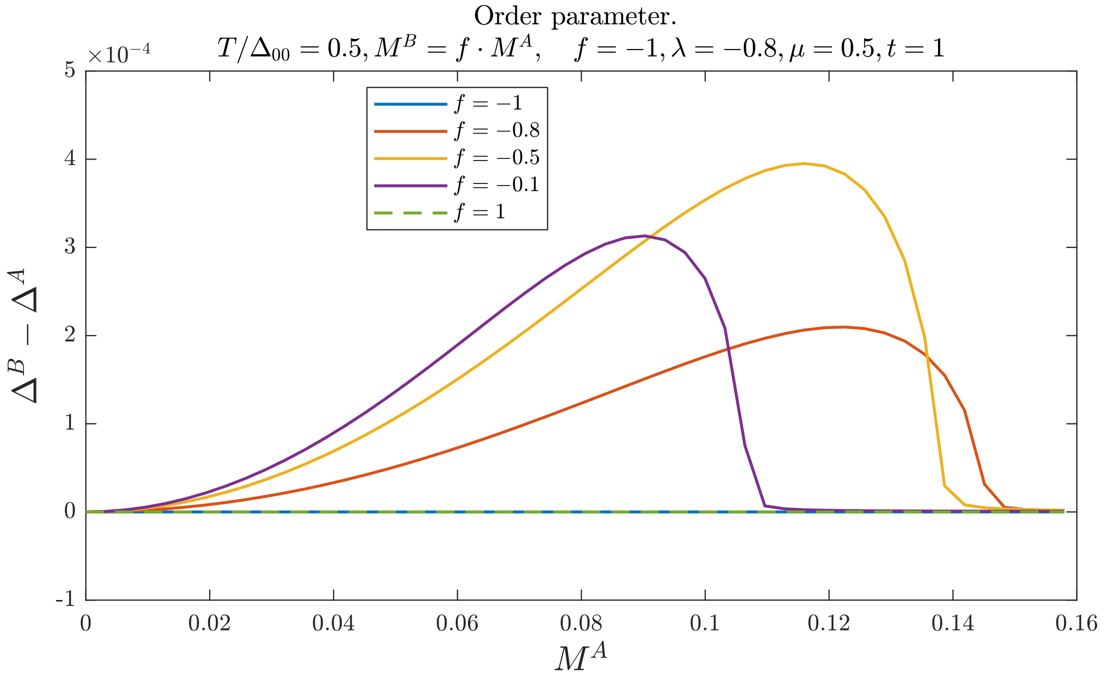

Critical T vs M.
$\lambda = -0.8, \mu = 0.5, t = 1$
$\mu = 0,5$
$f = -1.00$
$f = -0.80$
$f = -0.50$
$f = -0.10$
$f = 1.00$
T_c
M_A ($\mathbf{m}_{i,AB} = M_{AB}\mathbf{e}_z, M_B = f \cdot M_A$)

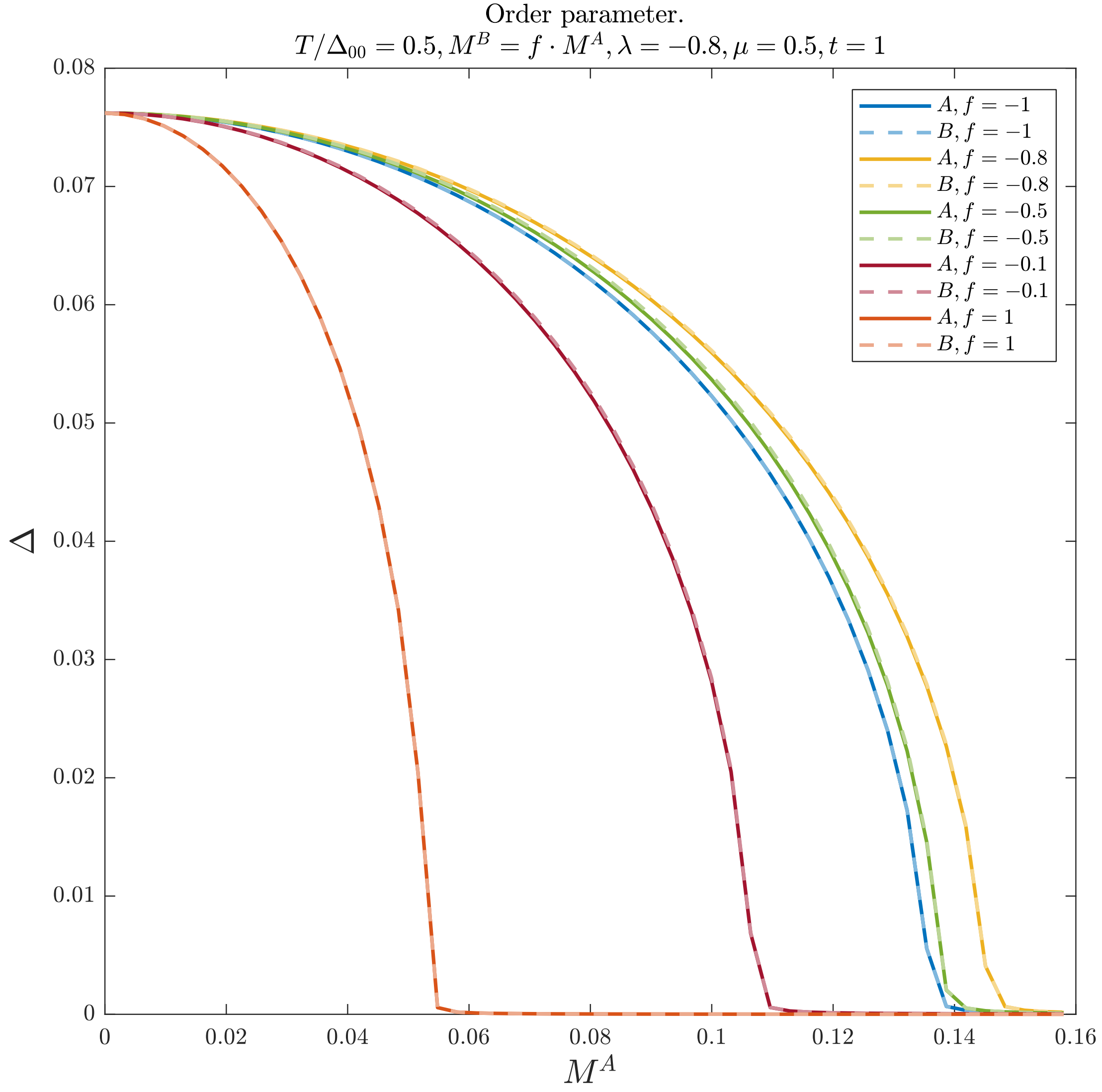

Critical T vs M.
$\lambda = -0.8, \mu = 0.1, t = 1$
$\mu = 0,1$
$f = -1.00$
$f = -0.80$
$f = -0.50$
$f = -0.10$
$f = 1.00$
M_A ($\mathbf{m}_{i,AB} = M_{AB}\mathbf{e}_z, M_B = f \cdot M_A$)


Critical T vs M.
$\lambda = -0.8, \mu = 0.02, t = 1$
$\mu = 0,02$
$f = -1.00$
$f = -0.80$
$f = -0.50$
$f = -0.10$
$f = 1.00$
M_A ($\mathbf{m}_{i,AB} = M_{AB}\mathbf{e}_z, M_B = f \cdot M_A$)

Ферримагнетик
«Гофрированный» параметр порядка

$\mu = 0{,}5$

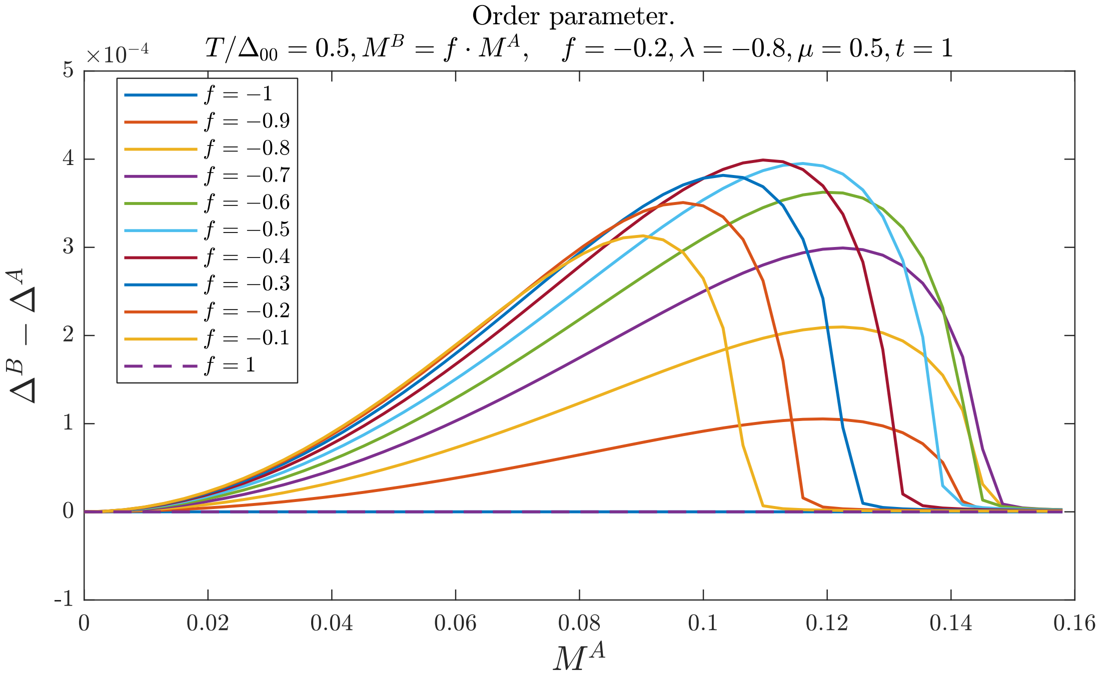


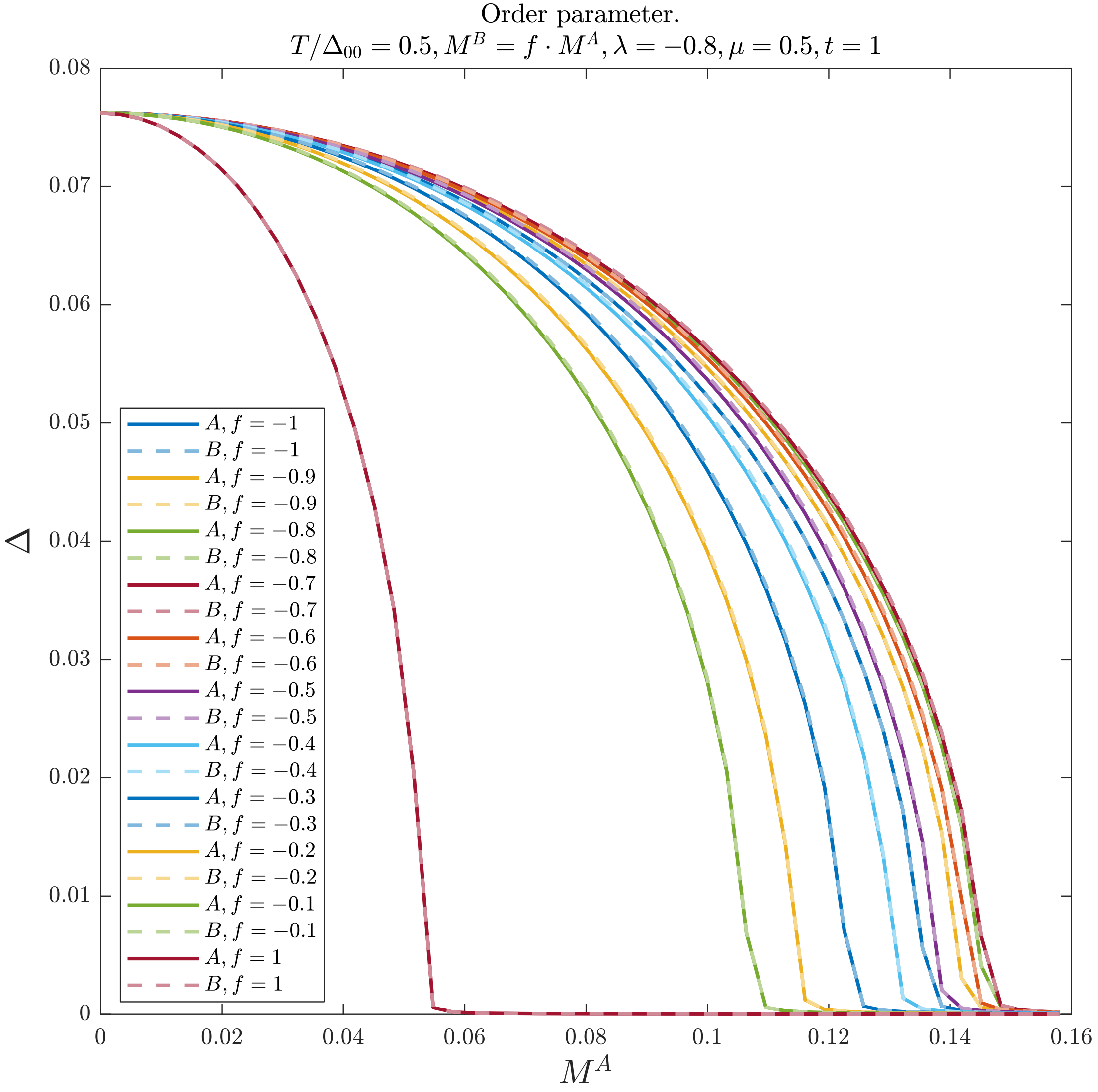


Ферримагнетик

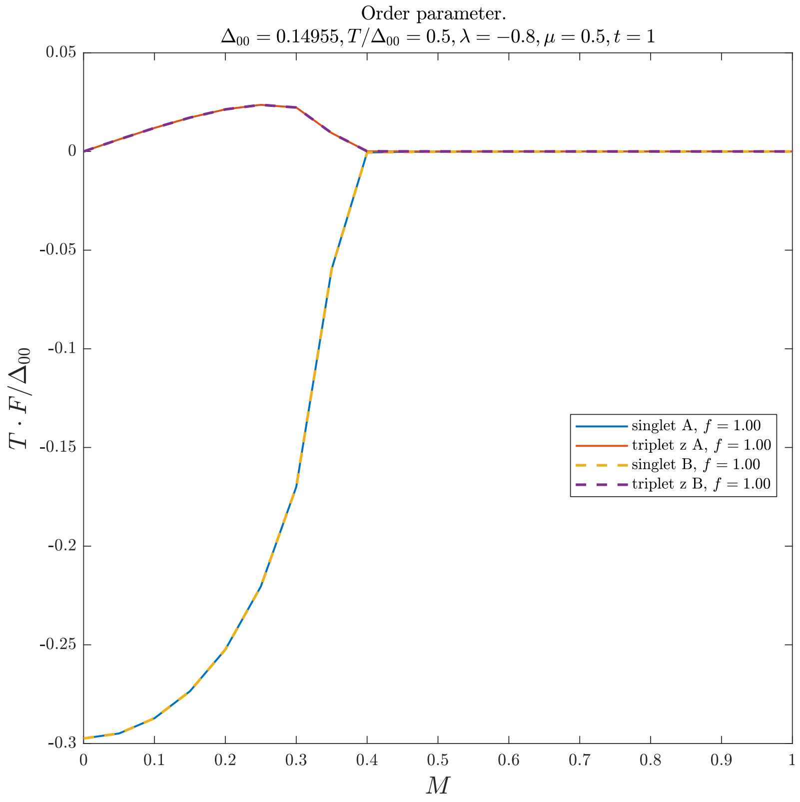
«Гофрированный» параметр порядка

$\mu = 0{,}5$

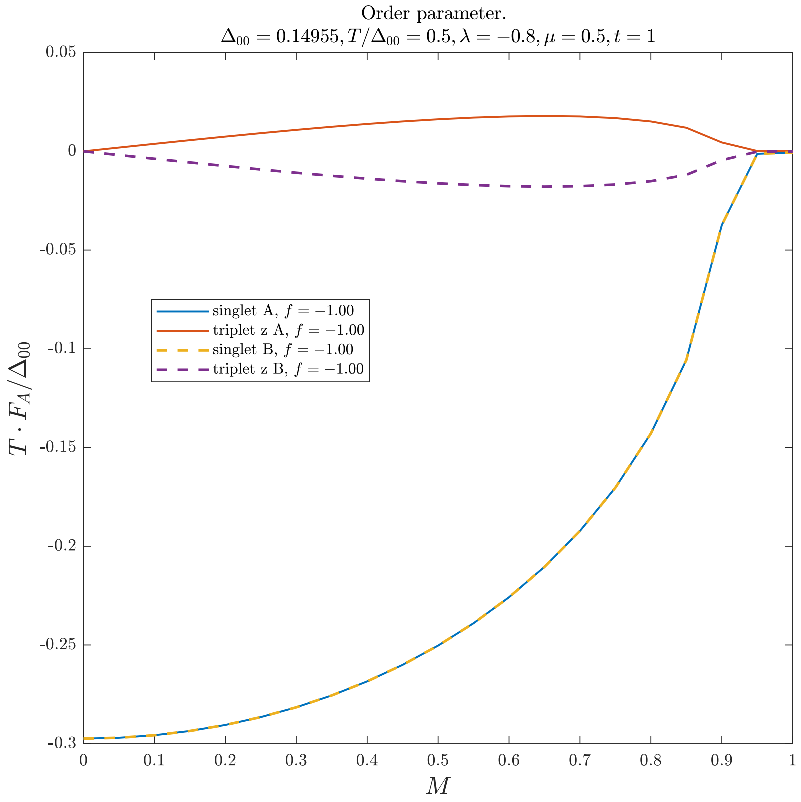




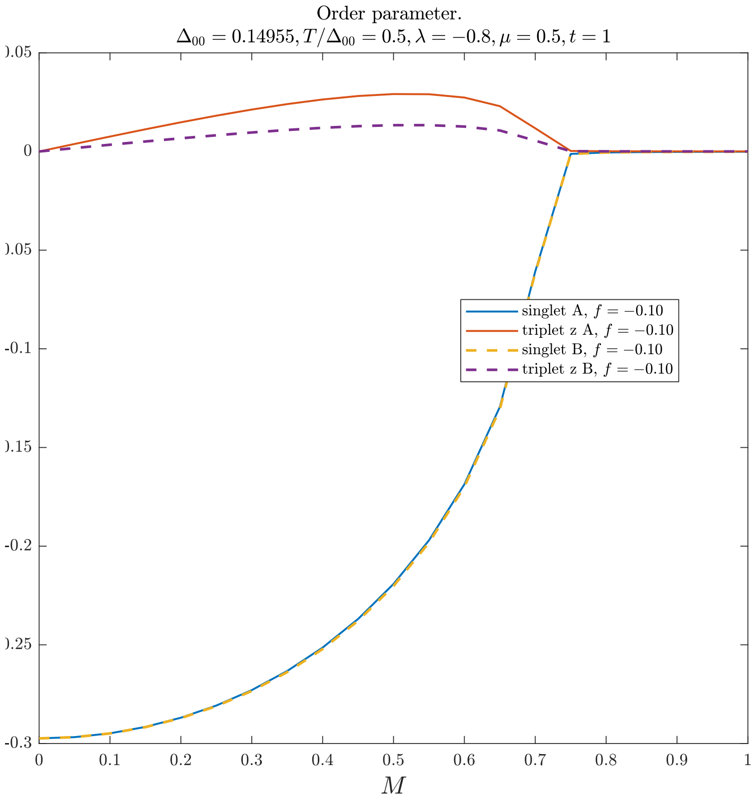
Ферримагнетик



$\mu = 0{,}5 \quad f = 1$

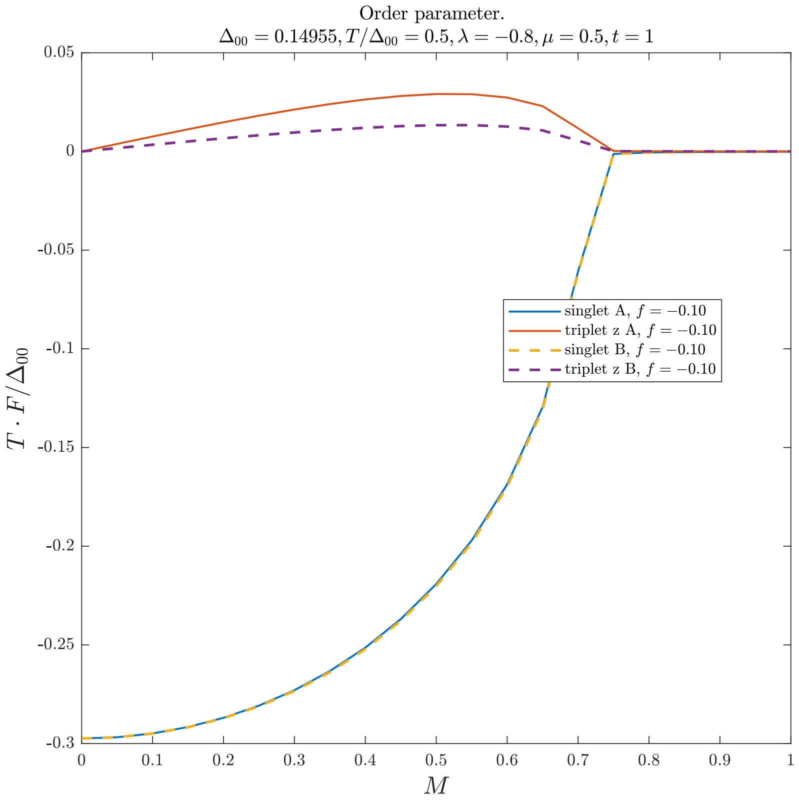


$\mu = 0{,}5 \quad f = -1$

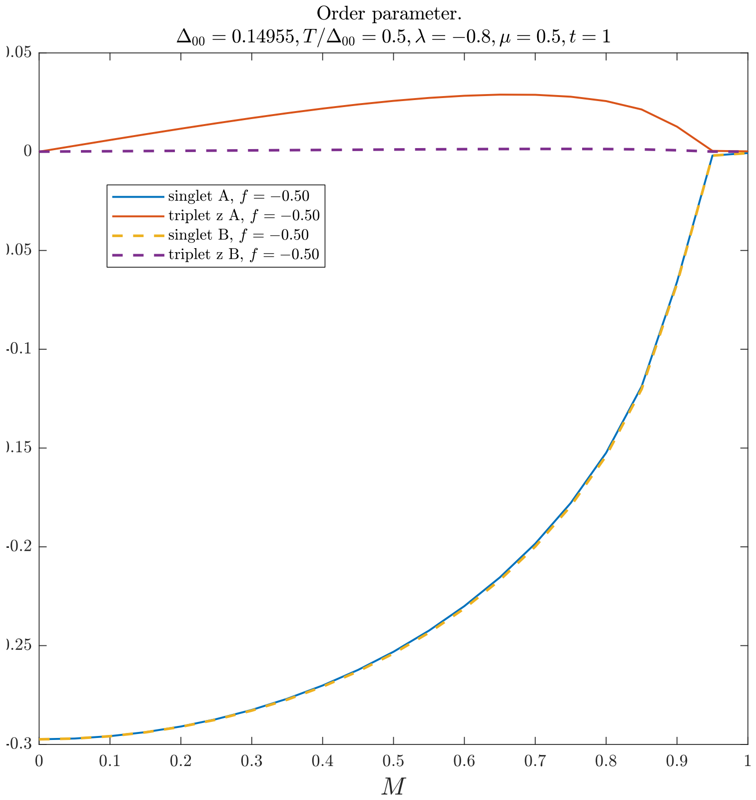


$\mu = 0{,}5 \quad f = -0{,}1$

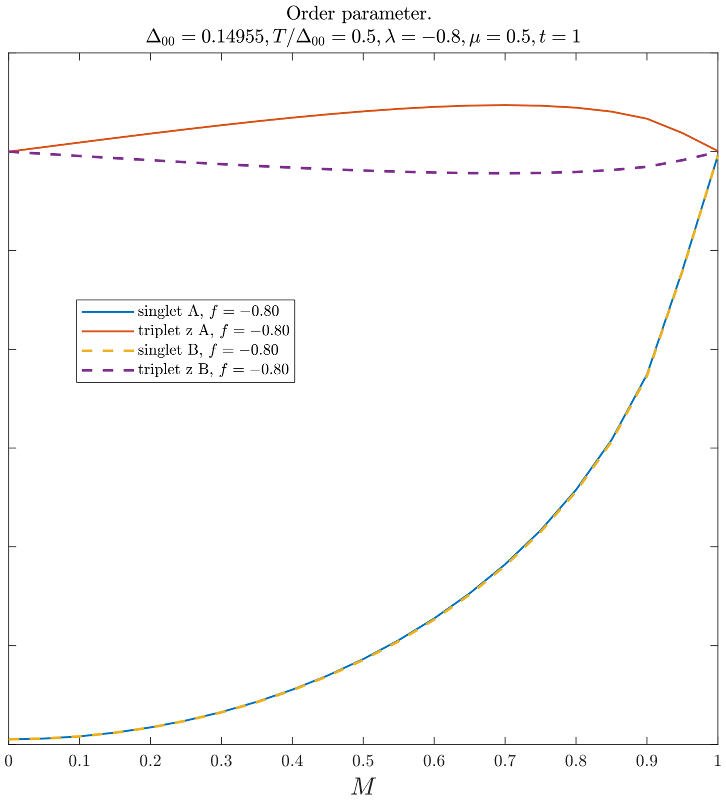
Ферримагнетик



$\mu = 0{,}5 \quad f = -0{,}1$



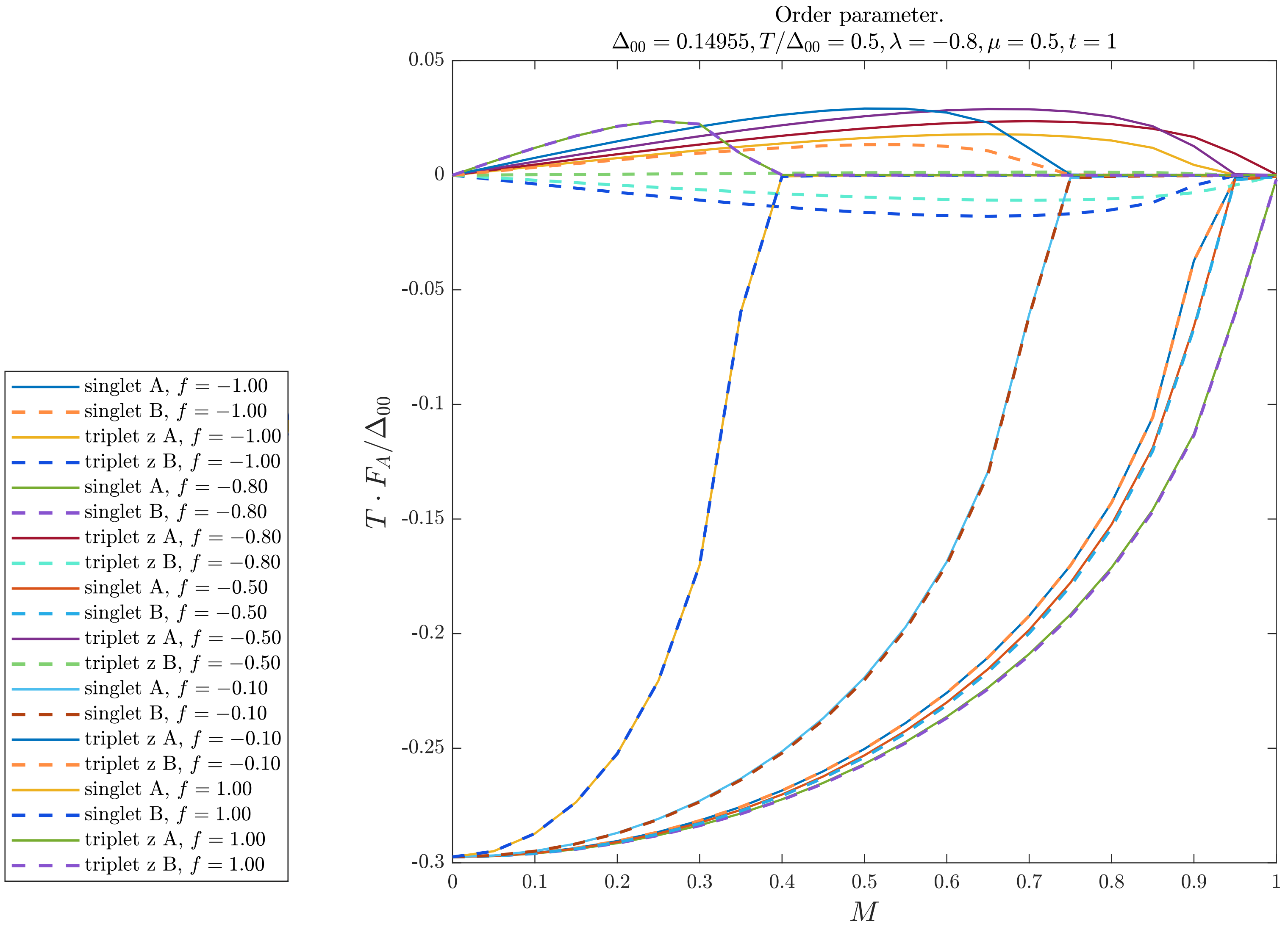
$\mu = 0{,}5 \quad f = -0{,}5$



$\mu = 0{,}5 \quad f = -0{,}8$

Ферримагнетик

$\mu = 0{,}5$



Спасибо за внимание